

Fe-Ni基超耐熱合金718の加工誘起粗大結晶組織と疲労破壊への影響に関する研究

著者	青木 宙也
号	63
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5623号
URL	http://hdl.handle.net/10097/00127621

氏 名	あおき ちゅうや 青 木 宙 也
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成31年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 金属フロンティア工学専攻
学 位 論 文 題 目	Fe-Ni基超耐熱合金718の加工誘起粗大結晶組織と疲労破壊への影響に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 及川 勝成
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 及川 勝成 東北大学教授 千葉 晶彦 東北大学教授 古原 忠

論 文 内 容 要 旨

第1章 緒言

民間航空市場は今後 20 年間で現在の市場規模の約 2 倍に拡大することが見込まれている成長産業である。日本では、国内の複数企業で共同出資して設立した日本エアロフォージ株式会社に世界最大級の大型油圧鍛造プレス機を導入し、2013 年より稼働を開始している。航空機エンジンの低圧タービンディスクに代表される大型鍛造品の国産化に期待が高まるが、人命を預かる重要部品であるだけに極めて高い信頼性が求められる。タービンディスクは引張耐力や引張強さの他、低サイクル疲労に対する耐性が特に重要であるため、熱間加工で微細結晶粒組織の造り込みが必須である。エンジン後段の低圧タービンディスク部材は、超耐熱合金 718 が主に使用されている。718 合金は、ピンニング粒子である δ 相の析出温度域で熱間加工を行うことで微細結晶粒組織を得ることができるが、低い塑性歪を導入すると溶体化処理中に異常な結晶粒の粗大化の発生を招く。また、十分に高い塑性歪でも低い歪速度で付与すると、同様に異常粗粒が発生する現象も一部報告されているが詳細は明らかにされておらず、低い塑性歪と低い歪速度に起因する加工誘起粗大結晶の発生を回避する条件を明確にすることは工業的に価値が高い。また、加工誘起粗大結晶の形成機構を追求して明らかにすることは学術的にも重要である。更に、加工誘起粗大結晶が疲労寿命を低減させる影響がどのような条件で顕著に働くのかを把握することは工業的にも重要である。そこで、本研究では、加工誘起粗大結晶の発生回避条件を特定し、加工誘起粗大結晶の形成機構を明らかにするとともに、加工誘起粗大結晶が低サイクル疲労寿命に与える影響を明確化する。

第2章 加工誘起粗大結晶発生の回避条件の特定

加工誘起粗大結晶発生を回避する熱間加工条件を特定するため、 δ 相が均一分散した微細結晶粒組織の 718 合金に対して種々の条件で熱間加工を行った後、溶体化処理を施し金属組織を評価した。その結果、加工誘起粗大結晶は、無数に点在する δ 相を乗り越えて溶体化処理中に発生した。また、加工誘起粗大結晶は低い塑性歪の付与

で発生する他、低い歪速度では、動的再結晶により結晶粒が微細化する高い塑性歪でも溶体化処理中に発生することを示した。そして、加工誘起粗大結晶が発生する塑性歪範囲は、歪速度が遅いほど高歪側へ拡大することを見出し、発生を回避するためには 0.05 s^{-1} 以上の歪速度で 0.4 以上の塑性歪を付与することが有効であることを明らかにした。また、加工誘起粗大結晶が発生する条件で熱間加工を行うと、加工誘起粗大結晶は熱間加工後の加熱中に発生するだけでなく、熱間加工後の冷却速度が遅い場合にも発生することを示した。

第3章 加工誘起粗大結晶の特徴および発生進展機構

微細結晶粒組織の 718 合金に種々の条件で熱間加工と加熱処理を行い、後方散乱電子回折(EBSD)や透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて金属組織を解析し、加工誘起粗大結晶の特徴や発生進展挙動を注意深く調査した。その結果、加工誘起粗大結晶が発生する塑性歪の範囲内では、塑性歪が低いほど結晶粒の粗大化は顕著であった。加工誘起粗大結晶の発生は結晶粒の異常な粗大化の他、焼鈍双晶の割合の増加と粒内ミスオリエンテーションの減少を示した。また、これらの組織変化を伴う加工誘起粗大結晶の巨視的進展は、蓄積歪エネルギーの高い領域から低い領域に向かって広がっていくことを明らかにした。熱間加工まま材の組織に着目すると、高い歪速度で塑性歪を付与した場合、粒内ミスオリエンテーションは加工誘起粗大結晶が発生する低い塑性歪の範囲では高いが、動的再結晶により結晶粒が微細化する高い塑性歪の範囲では低下していた。一方、低い歪速度では、結晶粒が微細化するような高い塑性歪においても粒内ミスオリエンテーションは高いことが特徴であった。加工誘起粗大結晶は、熱間加工まま材の粒内ミスオリエンテーションが高い領域で加熱中に発生することを示した。また、低歪速度で塑性歪を付与する場合、加工誘起粗大結晶が発生する塑性歪範囲が高歪側へ拡大する挙動は、粒内ミスオリエンテーションが臨界値を超える領域で発生することに起因していることが明らかとなった。また、加工誘起粗大結晶の発生核は、核生成や歪誘起粒界移動によって発生した動的再結晶粒であることを見出し、動的再結晶粒と周囲の変形マトリクス、あるいは動的再結晶粒間の粒内ミスオリエンテーションの差を駆動にした 1 次再結晶現象として、加工誘起粗大結晶組織が発達することを明らかにした。

上述したように、加工誘起粗大結晶の発生には焼鈍双晶の割合の増加も特徴である。加工誘起粗大結晶組織の発達と焼鈍双晶の関係について調査し結果、加工誘起粗大結晶は双晶の拡大とともに双晶界面に沿った粒界移動により発達していることを示した。粒界移動の方向を特定するため、同一方向に成長している結晶粒内の母結晶と 1 次双晶および 2 次双晶について方位解析を行った。その結果、母結晶と 1 次双晶、2 次双晶には共通する(110)方向が 1 本のみ存在し、この共通(110)方向と結晶の成長方向が一致していた。同様に、母結晶と互いに結晶方位が異なる 2 つの 1 次双晶についても、これら 3 つの結晶の間に存在する共通(110)方向と結晶の成長方向が一致することを明らかにした。FCC 結晶の{111}面に囲まれた八面体について、Fig.1(a)に母結晶と 1 次双晶、2 次双晶、Fig.1(b)に母結晶と 2 つの 1 次双晶の配置模式図をそれぞれ示している。Fig.1(a)(b)から母結晶と 2 つの双晶は互

いに結晶方位は異なるが、共通する $\langle 110 \rangle$ 方向で原子の並びが一致しており、この方向への粒界移動が優先して起こると考えられる。本研究により、加工誘起粗大結晶組織の主な発達は、双晶割合の増加とともに双晶界面に沿った $\langle 110 \rangle$ 方向への大規模な粒界移動に起因することを見出した。また、粒界の一部では、母結晶と双晶の $\langle 111 \rangle$ 共通回転軸方向(双晶界面に垂直な $\langle 111 \rangle$ 方向)への局所的な粒界の張り出しが観察された。この機構は結晶粒の顕著な粗大化に発達するものではなく、高次の双晶化により、双晶の形成方向を変えながら結晶粒の形態を複雑化するものであることを示した。その他、粒界近傍で双晶を形成することで粒界の高角粒界が低角粒界に変化し、加工誘起粗大結晶の形成が粒界移動による成長だけでなく、隣接する結晶粒の合体によって起こっている可能性を示した。

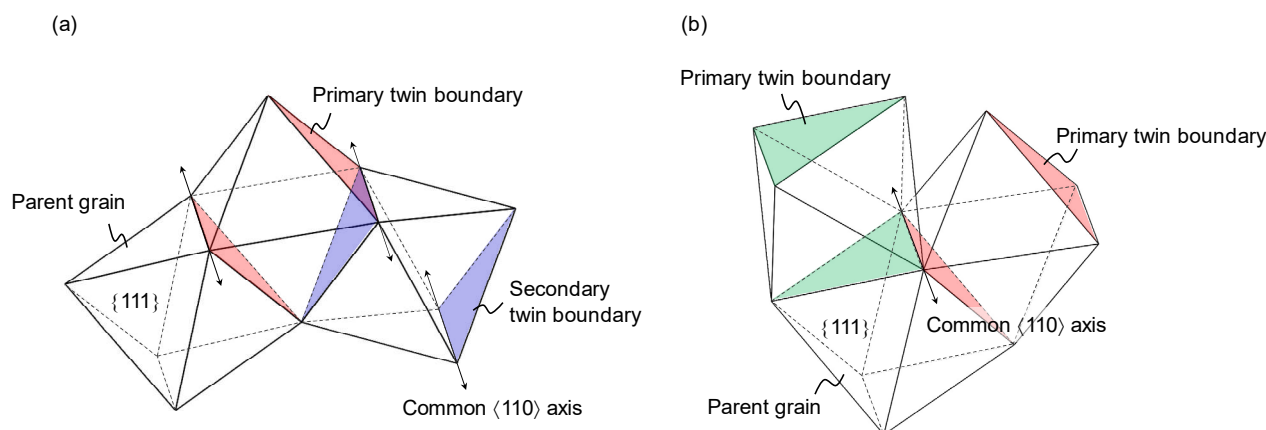


Fig.1 Illustration of arrangement of regular octahedron surrounded by $\{111\}$ planes.

(a)parent grain, primary twin and secondary twin, (b)parent grain and two different primary twins.

第4章 疲労破壊に及ぼす加工誘起粗大結晶の影響

微細結晶粒組織の718合金に熱間加工を行った後、溶体化処理と時効処理を施し、微細結晶粒組織と低歪部で発生させた加工誘起粗大結晶組織について歪制御による低サイクル疲労試験を行い、疲労破壊に及ぼす加工誘起粗大結晶の影響を検証した。その結果、室温での疲労試験では、微細結晶粒組織と加工誘起粗大結晶組織の疲労寿命はすべての歪範囲条件(1.2, 1.0, 0.8, 0.6%)で同程度であった。一方、538℃での疲労試験で加工誘起粗大結晶組織の疲労寿命は、歪範囲1.2%では微細結晶粒組織のそれと同程度であるが、歪範囲1.0%以下で大きく低減することを示した。したがって、疲労寿命に及ぼす加工誘起粗大結晶の影響は、試験温度や歪範囲条件によって大きく異なることが明らかとなった。この疲労寿命の大幅な低減は、加工誘起粗大結晶粒を疲労起点とするファセット破壊であることに起因していた。また、このファセット破壊は双晶界面または双晶界面に平行な $\{111\}$ 面から発生しており、双晶界面が耐疲労特性を低下させる要因であることが示唆された。

第5章 結言

第2章から第4章の結果の総括と、本研究に関する知的財産を述べている。また、本研究で得られた知見を活用し、民間航空機用エンジンに使用される 718 合金の傘状ディスクに関する製品適用例を示している。

論文審査結果の要旨

超耐熱合金 718 は、航空機用エンジンのタービンディスクなどの高温部材に用いられる。高温強度だけでなく、疲労強度も要求されることから、微細結晶粒が求められる。通常は、 $\text{Ni}_3\text{Nb}(\text{DOa})$ を析出させながら熱間鍛造を行うことで、微細結晶粒を得ているが、鍛造条件によっては異常粗大結晶粒となり疲労強度が低下する。従って、超耐熱合金 718 のミクロ組織を最適化しながら鍛造できる条件を明らかにすることは、この合金による耐熱部材を安定して製造という観点では必要不可欠である。

本論文では、熱間加工により誘起される異常粗大結晶粒を加工誘起粗大結晶と位置づけ、その発生条件や形成機構、疲労破壊に及ぼす影響を調べたものであり、全 5 章よりなる。

第 1 章は、緒言であり、本論文の背景と目的を述べている。

第 2 章では、加工誘起粗大結晶が発生する熱間加工条件の影響を調べている。加工誘起粗大結晶は低い塑性歪で発生する他、低い歪速度では、動的再結晶により結晶粒が微細化する高い塑性歪でも溶体化処理中に発生することを示した。そして、加工誘起粗大結晶の発生を回避するための塑性歪量と歪速度を特定している。

第 3 章では、加工誘起粗大結晶組織の特徴と形成挙動について、組織解析の結果を示している。低歪速度で加工誘起粗大結晶が発生する塑性歪範囲が高歪側へ拡大する挙動は、粒内ミスオリエンテーションが臨界値を超える領域で発生することに起因している。加工誘起粗大結晶の発生核は、核生成や歪誘起粒界移動による動的再結晶粒であることを見出し、発生核と周囲との粒内ミスオリエンテーションの差を駆動にした 1 次再結晶現象として、加工誘起粗大結晶組織が発達することを述べている。更に、加工誘起粗大結晶は、その形成初期段階から、双晶割合の増加と双晶界面に沿った $\langle 110 \rangle$ 方向への大規模な粒界移動により発達することを見出した。また、粒界の一部では、 $\langle 111 \rangle$ 方向への高次の双晶化に伴う局所的な粒界の張り出しや、双晶形成に起因する結晶粒の合体が観察された。これらの双晶形成の機構により、加工誘起粗大結晶組織は結晶粒が粗大であることに加えて、複雑な形態に発達することを明らかにした。

第 4 章では、種々の疲労試験条件について、加工誘起粗大結晶組織と微細結晶粒組織の疲労寿命を比較し、加工誘起粗大結晶組織が疲労寿命を大きく低下させる疲労試験条件を特定した。加工誘起粗大結晶を起点とする疲労破壊は、破面形態の観察と起点断面の組織解析により、双晶境界からき裂が発生することが示唆された。

第 5 章は、結果の総括である。

以上の通り、本論文は、超耐熱合金 718 の熱間鍛造時の加工誘起粗大結晶組織の形成条件を明らかにするとともに、その形成メカニズムについても明らかにしている。更に、加工誘起粗大結晶組織の疲労強度への影響を示しており、超耐熱合金 718 の応用拡大に対する学術面の寄与が少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。